

ศึกษาการเชื่อมต่อระบบกริดสำหรับตัวควบคุมแบบดิจิทัล Study of Grid Synchronizing Techniques for Digital Controller

ณิชมน พูนน้อย¹ พงษ์ศิริ มุ่งพร² สุวัจน์ ลิกบุตร² บุรินทร์ ยอดวงศ์² และ ปฏิพัทธ์ ทวนทอง¹

¹ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน ภาควิชาครุศาสตร์ ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

²สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

E-mail: {nitchamonp, pongsirim, suwatsi, buriny, phtt}@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการคำนวณเฟสล็อกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ใช้โซลาร์เซลล์พิกัด 800 วัตต์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ามีวงจรอินเวอร์เตอร์แปลงผันพลังงานไฟฟ้า วิธีการเฟสล็อกนี้จะได้รูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความสูงและเฟสตรงกับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการค้นหาเฟสซีแควน จากนั้นทดลองขนานเข้ากับกริดด้วยหม้อแปลง อัตราขยายแรงดัน 80V:220V ในส่วนของภาคควบคุมนี้จะใช้การควบคุมแบบดิจิทัลด้วยการประมวลผลบนดีสเปซ DS 1104 การควบคุมด้วยคอนโทรลเลอร์นี้มีจุดเด่นคือ มีขนาดเล็ก การแก้ไข ปรับปรุง พารามิเตอร์ทำได้ง่าย มีความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ชุดทดลองทางด้านฮาร์ดแวร์ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นจริงในห้องทดลองที่ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เพื่อพิสูจน์ยืนยันวิธีการควบคุมและกฎการควบคุมผลการพิสูจน์ให้เห็นว่าระบบทำงานได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: โซลาร์เซลล์ อินเวอร์เตอร์ การขนานระบบไฟฟ้า กริดไทน์

Abstract

This paper proposes a Phase Lock Loop technique for 3-Phase inverter grid-connected, in the experiment, a 800W solar cell panels (PV) was used as a power supply. The phase locked loop in this paper produces a saw tooth output that matches phase and frequency using the zero crossing information only. This allows simplified phase detection methods to be used. We regulate the rms output voltage to be constant at 80V, and then, step-up to the 220 V by a transformer. The proposed control algorithm is digitally implemented in the DS1103 dSPACE control platform. Experimental results with a small-scale test bench in the laboratory verified the closed-loop performance of this system during drive cycles. The prototype test bench of the studied power plant was implemented in the RERC laboratory, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

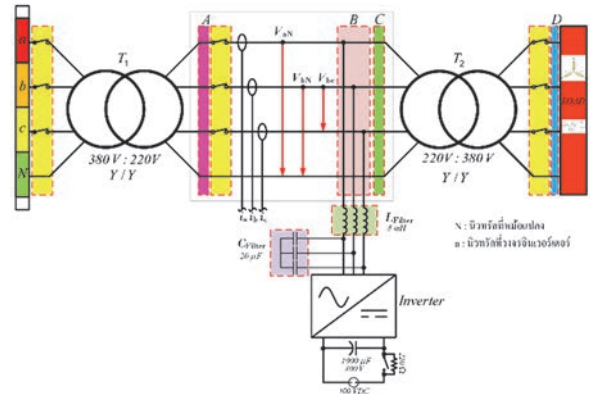
Keyword: photovoltaic array, inverter, grid connected, grid tie

1. บทนำ

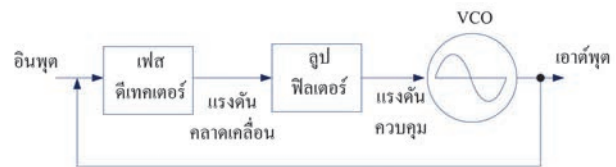
เนื่องจากกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าภายในประเทศไทย ที่จ่ายให้กับผู้ใช้งาน (Utility) มีปริมาณจำกัดไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้งานจำเป็นต้องนำแหล่งพลังงานเข้าจากต่างประเทศทั้งน้ำมันเชื้อเพลิง และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งโรงไฟฟ้าความร้อนร่วมนี้มีอัตราส่วนการผลิตที่สูงมากถึงร้อยละ 70 ของกำลังผลิตไฟฟ้าทั้งหมดซึ่งขณะเดียวกันความต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงก็สูงขึ้นเรื่อยๆ ราคาต่อหน่วยก็ปรับตามดังนั้นต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงมีการปรับราคาขึ้นทุกๆ ปีเพื่อลดการพึ่งพาการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศในส่วนของการผลิตไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในประเทศให้มากขึ้น

ปัจจุบันแหล่งพลังงานทดแทนมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่น เซลล์เชื้อเพลิง (FC) โซลาร์เซลล์ (PV) กังหันลม (WT) ทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นแหล่งพลังงานสะอาด แต่ยังมีข้อจำกัดคือไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มีขนาดแรงดันต่ำ กระแสสูง และมีข้อจำกัด เช่น ปริมาณลม (กังหันลม) ความเข้มของแสงแดด (โซลาร์เซลล์) อัตราการไหลของก๊าซ (เซลล์เชื้อเพลิง) การเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าทดแทนเข้ากับโครงข่ายของการไฟฟ้า (On Grid) จะใช้วงจรแปลงผันเพื่อปรับเปลี่ยนรูปคลื่นแรงดันให้เหมาะสมกับรูปแบบการเชื่อมต่อตามต้องการคือรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Line) ด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) การเชื่อมต่อแบบขนานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นวิธีที่ยาก มีความเชื่อมั่นน้อย ราคาต่อหน่วยแพงเมื่อเทียบกับการเชื่อมต่อแบบไฟฟ้ากระแสตรง

กริดไทน์อินเวอร์เตอร์ (Grid Tie Inverter) มีหลักการทำงานดังภาพที่ 1 โดยรับไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าทดแทนจากนั้นจะนำไปแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยหลักการสวิตชิ่งซึ่งมีขนาด ลำดับเฟส และความถี่ตรงกับระบบไฟของการไฟฟ้าด้วยวิธีเฟสล็อกสูป เมื่อตรงตามเงื่อนไขดังกล่าวภาคควบคุมจะทำการขนานไฟ (Synchronizing) ที่ได้จากอินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบของการไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าทดแทนจะไหลเข้าไปยังระบบของการไฟฟ้าไปที่โหลดที่ต่ออยู่ตามลำดับ ส่งผลให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) สามารถลดกำลังผลิตลงได้



ภาพที่ 1 แบบจำลองการต่อกริดไทน์อินเวอร์เตอร์เข้ากับกริดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต



ภาพที่ 2 แผนผังของเฟสล็อกสูป

2. เฟสล็อกสูปด้วยวิธี P-Q Theory

เฟสล็อกสูปเป็นระบบป้อนกลับที่บังคับให้วงจรออสซิลเลเตอร์มีความถี่หรือเฟสเปลี่ยนไปตามความถี่หรือเฟสของสัญญาณอ้างอิงภายนอกเฟสล็อกสูปประกอบไปด้วยส่วนที่ทำงานร่วมกัน 3 ภาค คือ ภาคเปรียบเทียบเฟสหรือเฟสดีเทกเตอร์ (Phase Detector) ภาคลูปฟิลเตอร์ (Loop Filter) และภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดัน (VCO) ดังภาพที่ 2

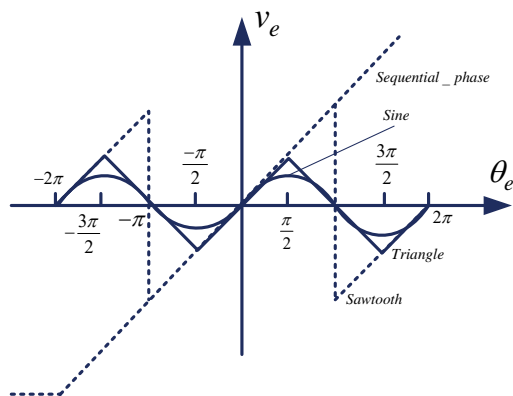
สัญญาณความถี่อ้างอิงภายนอกเป็นสัญญาณรายคาบ (Periodic) เข้ามาที่อินพุต ภาคเปรียบเทียบเฟสจะทำหน้าที่เปรียบเทียบเฟสระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณจากภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดัน เอาต์พุตที่ได้จากภาคเฟสดีเทกเตอร์จะมีลักษณะแรงดันที่มีแอมพลิจูดเป็นสัดส่วนกับผลต่างในเฟสของสัญญาณทั้งสองที่ทำการเปรียบเทียบแรงดันผลต่างนี้ป้อนไปให้วงจรลูปฟิลเตอร์ซึ่งเป็นชนิดโลว์พาสฟิลเตอร์กรองเอาเฉพาะความถี่ที่ต้องการเพื่อส่งไปภาคควบคุมออสซิลเลเตอร์ของภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดันต่อไป

เมื่อลูปอยู่ในสภาวะล็อก (Lock) ความถี่ของภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดันจะเท่ากับความถี่ของสัญญาณอินพุตพอดี อาจจะมีเฟสแตกต่างกันออกไป แต่ค่าเฟสที่แตกต่างนั้นจะมี

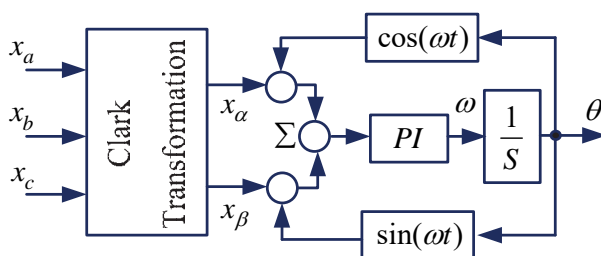
ค่าคงที่ (Constant Phase Difference) ในกรณีที่มีเฟสไม่ตรงกับภาคเฟสดีเทคเตอร์จะจ่ายแรงดันคลาดเคลื่อน (Error Voltage) ไปควบคุมการทำงานของภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดัน เพื่อให้ไม่ให้เกิดคลาดเคลื่อนจนกว่าจะเข้าสู่สภาพล็อกเอาต์พุตของภาคกำเนิดสัญญาณด้วยแรงดันจึงมีแอมพลิจูดที่สม่ำเสมอ แต่ความถี่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณอินพุตดังภาพที่ 3

ตารางที่ 1 การจำแนกเฟสล็อกูป

No.	PLL	Phase detector	Loop Filter	Oscillator
1	Linear PLL(Analog)	Analog	Analog	Voltage Controlled Oscillator (VCO)
2	Digital PLL	Digital	Analog	VCO
3	All digital PLL	Digital	Digital	Digital Controlled Oscillator (DCO)
4	Software PLL	Software	Software	Software



ภาพที่ 3 การเกิดสัญญาณลอคความถี่เมื่อเทียบกับไซน์อ้างอิง



ภาพที่ 4 เฟสล็อกูปด้วยวิธี PQ-PLL

ตารางที่ 1 ในการคำนวณหาเฟสล็อกูปแบบดิจิทัล เนื่องจากกริดจะมีความถี่ที่นอกเหนือจากความถี่มูลฐานป้อนมา

ทำให้การคำนวณผิดพลาด [1], [2] ได้นำเสนอวิธีแก้ปัญหา ดังกล่าวด้วยการนำผลจากสมการคลากทรานสฟอร์มมาใช้วิธีการของ PQ-PLL มาคำนวณดังภาพที่ 4

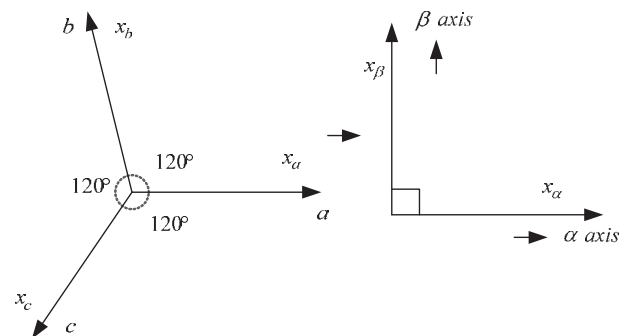
3. ปาร์ก-คลาก ทรานสฟอร์ม (Park-Clarke Transformation)

[3],[4]การศึกษาพฤติกรรมของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามเฟสโดยทั่วไปต้องการทราบค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเป็นสมการคณิตศาสตร์ วิธีการแปลงค่าตัวแปรจะมีสองวิธีคือ

3.1 คลาก-ทรานสฟอร์ม (Clarke-Transformation)

ปริมาณเวกเตอร์แบบสามเฟสสามารถแปลงเป็นเวกเตอร์สองเฟสหมุนบนแกนคงที่ ด้วยการ ใช้ คลาก-ทรานสฟอร์ม แสดงในภาพที่ 5 และมีสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (1)$$



ภาพที่ 5 เวกเตอร์คลาก-ทรานสฟอร์ม

เมื่อ x_α, x_β คือ ปริมาณเวกเตอร์บนแกนหมุนคงที่

x_a, x_b, x_c คือ ปริมาณของเวกเตอร์สามเฟส

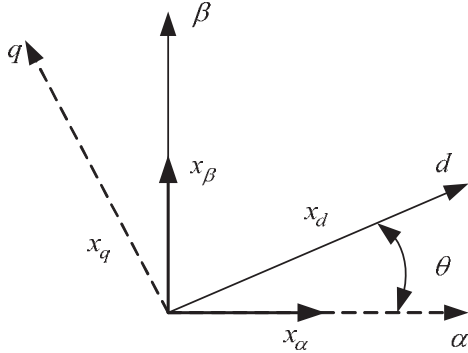
ดังนั้น x_α เป็นค่าที่ซ้อนทับกับ x_a เมื่อรวม $i_a + i_b + i_c = 0$

3.2 ปาร์ก-ทรานสฟอร์ม (Park-Transformation)

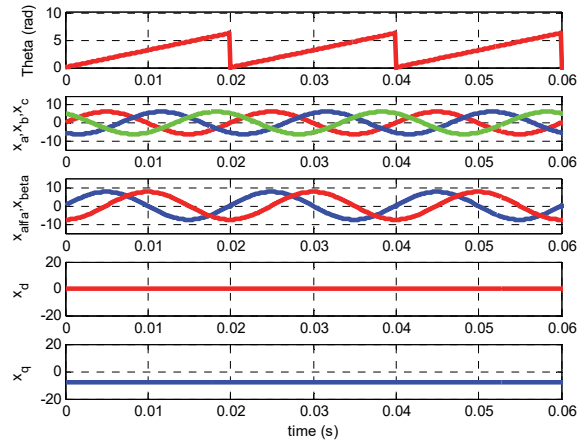
ปริมาณแกนอ้างอิงสองเฟสอยู่กับที่สามารถเปลี่ยนเป็นปริมาณแกนหมุนอ้างอิงด้วยวิธีปาร์ก ทรานสฟอร์มแสดงในภาพที่ 6 สามารถคำนวณด้วยสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ x_d, x_q คือ ปริมาณของเวกเตอร์อ้างอิง
 x_α, x_β คือ ปริมาณเวกเตอร์บนแกนหมุนคงที่
 θ คือ มุมของการหมุน



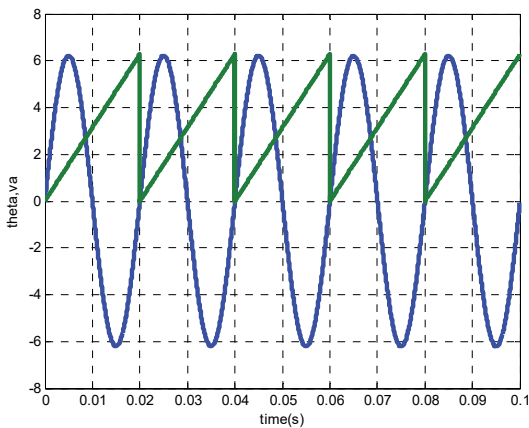
ภาพที่ 6 เวกเตอร์พาร์ก-ทรานสฟอร์ม



ภาพที่ 8 รูปคลื่นจากการคำนวณด้วยพาร์ก-ทรานสฟอร์ม

3.3 จำลองระบบควบคุมด้วยซิมูลิงค์ แมทแลป

จากสมการทั้งสองนำไปจำลองบนโปรแกรมซิมูลิงค์/แมทแลป เพื่อทดลองการคำนวณเฟสลอคคูปและปริมาณแกน d-axis, q-axis สำหรับใช้ในวงจรควบคุมลูปปิดต่อไป ด้วยการกำหนดความถี่มูลฐานเป็น 50Hz ค่ายอด 310V_p เมื่อสัญญาณไซน์ผ่านสมการคลาก-ทรานสฟอร์มได้ผลดังภาพที่ 7, 8

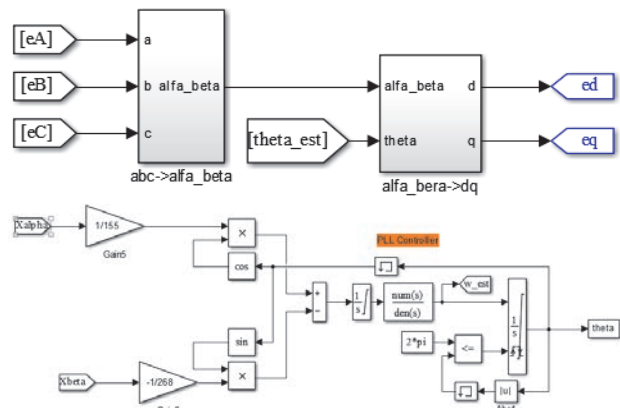


ภาพที่ 7 รูปคลื่นเฟสลอคคูป(theta) เทียบกับแรงดัน v_{aN}

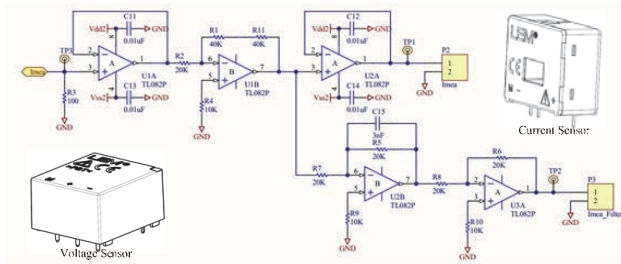
4. การทดลอง

4.1 ภาควควบคุมด้วยดิจิทัล

ระบบนี้เป็นระบบต้นแบบจะมีการควบคุมผ่านทาง dSPACE บอร์ดดังแสดงในภาพที่ 12 dSPACE คือตัวควบคุมที่มี Digital Signal Processor (DSP) ทำหน้าที่ประมวลผล ซึ่งจะเหมือนกับบอร์ด DSP ทั่วไป แต่จะดีกว่าบอร์ด DSP ที่ผู้ออกแบบสามารถสร้างแนวระบบควบคุม (Control Algorithm) ใน MATLAB/Simulink และแปลงเป็นภาษาเครื่องของ DSP แล้วตั้งทำงานซึ่งการพัฒนาระบบจะเร็วกว่าบอร์ด DSP ทั่วไปอีกทั้งยังมีตัวแปลงสัญญาณ Analog to Digital Converters (ADCs) และ Digital to Analog Converters (DACs) ให้แล้วผู้พัฒนาระบบไม่ต้องมาออกแบบสร้างขึ้นเอง งานวิจัยนี้มี dSPACE Platform เป็นตัวควบคุม



ภาพที่ 9 บล็อกไดอะแกรมที่ใช้เขียนลงในคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 10 วงจรเซนเซอร์แรงดันและเซนเซอร์กระแส

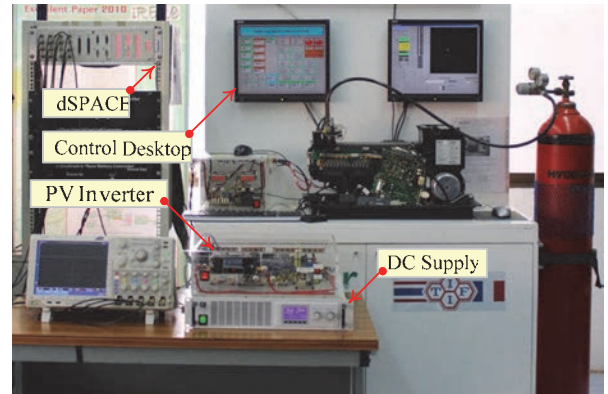
4.2 วงจรวัดแรงดันและกระแส

ภาคกำลังจะมีการใช้กระแสและแรงดันที่สูง ดังนั้นการวัดรูปคลื่นสำหรับภาคควบคุมจะต้องใช้อุปกรณ์ที่แยกกราวด์ของภาคกำลังกับภาคควบคุมออกจากกัน งานวิจัยนี้เลือกใช้เซนเซอร์แรงดัน LV57 มีจุดเด่นคือสามารถใช้กับแรงดันได้หลายขนาดด้วยการคำนวณตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับเซนเซอร์ให้มีค่าตามต้องการ มีความเที่ยงตรงสูง ผลตอบสนองเป็นเชิงเส้น ทำงานที่ความถี่สูงได้ การสูญเสียต่ำ แต่เอาต์พุตที่ได้เป็นกระแสจึงต้องเข้าวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันอีกที

ส่วนเซนเซอร์กระแส LA-55P มีจุดเด่นคือสามารถใช้กับกระแสได้หลายขนาดด้วยการคำนวณจำนวนรอบของขดลวดที่คล้องให้มีค่าตามต้องการ ไม่มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าทำให้แยกภาคควบคุมกับภาคกำลังออกจากกันได้ มีความเที่ยงตรงสูง ติดตั้งบนแผ่นปริ้น การตอบสนองเป็นเชิงเส้น ทำงานที่ความถี่สูงได้ แต่เอาต์พุตที่ได้เป็นกระแสจึงต้องเข้าวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันต่อไปดังภาพที่ 10

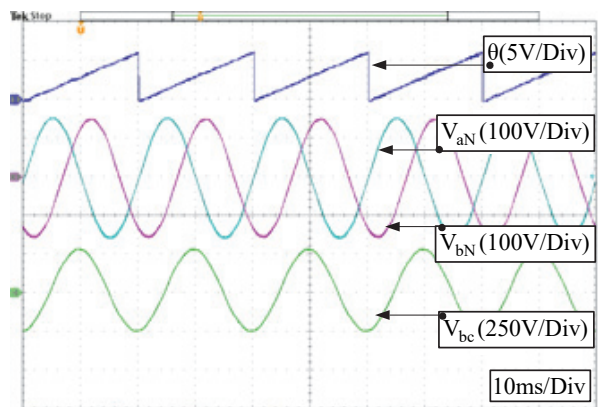
ตารางที่ 2 รายการและข้อกำหนดทั่วไปของวงจร

รายการ สัญลักษณ์ /	ข้อกำหนด
แรงดันด้านเข้า (V_{DC})	100V
กระแสด้านเข้า (I_{DC})	8A
แรงดันด้านออก (V_{bus})	220V
ความถี่สวิตช์กำลัง (f_{sw})	25kHz
สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (S)	IRFP264N (250V, 38A, 0.75 Ω)
ไดโอด (D_1, D_2)	RURG3020 (200V, 30A)

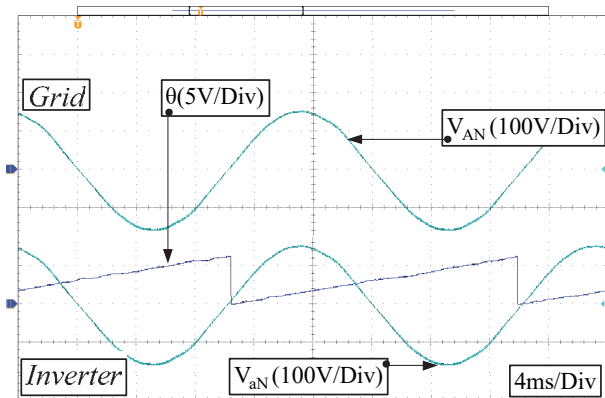


ภาพที่ 11 ระบบต้นแบบและชุดทดลองที่ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน (RERC)

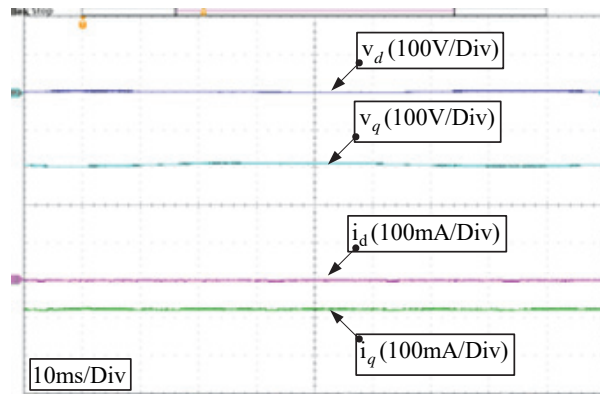
ชุดทดลองที่ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน (RERC) มีรายละเอียดตามตารางที่ 2 หลักการทำงานคือวัดแรงดัน v_{aN}, v_{bN}, v_{cN} ผ่านวงจรวัดเฟสและวงจรถอดทอนเพื่อลดระดับแรงดันโดยให้ค่าเอาต์พุตที่ต้องการก่อนเข้าหม้อแปลงซึ่งมีค่าเท่ากับ 310 V_p ถูกลดทอนให้มีค่าเท่ากับ 1V เพื่อเป็นสัญญาณป้อนกลับไปเข้าภาค ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วนำไปคำนวณด้วยสมการปาร์ก-คลาก ทรานสฟอร์ม จะได้สัญญาณเฟสล็อกคลุและ d-axis, q-axis สำหรับใช้ในวงจรถวลควบคุมรูปปิดต่อไปจากนั้นจะถูกนำไปสร้างสัญญาณควบคุมการมอดดูเลชันแบบ Sinusoidal Pulse width modulation (SPWM) เมื่อได้สัญญาณ SPWM จำนวน 3 ชุดที่มี dead-time 2 μ s เพื่อไปขับสวิตช์ที่ขาเกตของ IGBT ให้ได้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ 80V เมื่อผ่านหม้อแปลงสเตปอัพจะได้ 310V_p การทดลองนี้จะควบคุมแบบลูปเปิดได้ผลตามภาพที่ 12-14 ตามลำดับ



ภาพที่ 12 รูปคลื่นที่ได้จากการวัด v_{aN}, v_{bN}, v_{cN} เทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากการคำนวณ θ ด้วยดิสเพลซ



ภาพที่ 13 รูปคลื่น θ เทียบกับ v_{aN} ของกริดและอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 14 รูปคลื่น v_d , v_q เทียบกับ i_d และ i_q ที่ได้จากการคำนวณด้วยคิสมเปซ

5. วิจารณ์ผล

ในการทดลองนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีแรงดันอินพุตอยู่ในช่วง 100V โดยวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสมีการคำนวณมุมเฟสด้วยวิธีการเฟสล็อกคูลูป เพื่อให้มีเฟสตรงกับกริดของการไฟฟ้าสำหรับการขนานแหล่งจ่ายไฟจากพลังงานทดแทนเข้าไป (ภาพที่ 12, 13) เนื่องจากวิธีเฟสล็อกคูลูปเป็นวิธีการคำนวณที่แม่นยำและสามารถบอกช่วงเวลาของสัญญาณได้ด้วยความสูงของสัญญาณสามเหลี่ยม โดยคำนวณจากสมการคลาก-ทรานส์ฟอร์ม ต่อจากนั้นเข้าสมการปาร์ก-ทรานส์ฟอร์ม จะได้สัญญาณ v_d, v_q เทียบกับ i_d, i_q ภาพที่ 14 เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับภาคควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ระบบควบคุมมีความแม่นยำและมีเสถียรภาพมากขึ้น

6. สรุป

ในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกริดไทร์ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์การกำหนดความถี่ใช้วิธีเฟสล็อกคูลูป เนื่องจากมีความแม่นยำ และสามารถบอกค่าเวลาได้ด้วยความสูงของแรงดันมุมเฟส ที่เวลา 2π ทำให้อินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นมีความถี่ตรงกับความถี่ของกริด (50Hz) ซึ่งจำเป็นสำหรับระบบขนานไฟฟ้าและมีสัญญาณแรงดันและกระแสแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีปาร์ก คลาก-ทรานส์ฟอร์มสำหรับใช้กับวงจรควบคุม มีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Simulink/Matlab เพื่อเป็นการทดสอบการทำงานตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบ จากนั้นทำการออกแบบและสร้างชิ้นงานตามฟังก์ชันตามที่คำนวณไว้และมีการเขียนโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ผลตรงกัน งานวิจัยนี้เหมาะสำหรับงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน เนื่องจากง่าย รวดเร็ว ความเชื่อมั่นสูง และสามารถควบคุมแบบลูปปิดได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.Karimi-Ghartemani, "Universal Integrated Synchronization and Control for Single-Phase DC/AC Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 3, pp. 1544-1557, March 2015.
- [2] S. A. Oliveira da Silva, R. Novochadlo and R. A. Modesto, "Single-phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems," 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, pp. 4706-4711, 2008.
- [3] P. Cossutta, S. Raffo, A. Cao, F. Ditaranto, M. P. Aguirre and M. I. Valla, "High speed single phase SOGI-PLL with high resolution implementation on an FPGA," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, pp. 1004-1009, 2015.
- [4] V. A. Prabhala, M. Céspedes and J. Sun, "Implementation of DQ domain control in DSP and FPGA," 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, pp. 1439-1444, 2012.